

## 스티프너 보강 유무에 따른 H형 전단패널 강재댐퍼의 역학특성

박해용<sup>1</sup> · 김호룡<sup>2</sup> · 김성보<sup>3</sup> · 엄태성<sup>4</sup> · 김진우<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>연구교수, 부산대학교 지진방재연구센터, <sup>2</sup>선임연구원, 한국건설생활환경시험연구원 내진센터,

<sup>3</sup>교수, 충북대학교 토목공학과, <sup>4</sup>교수, 단국대학교 건축학부

## Mechanical Characteristics of H-Type Shear Panel Steel Damper with Reinforcement of Stiffener

Park, Hae Yong<sup>1</sup>, Kim, Ho Ryong<sup>2</sup>, Kim, Sung Bo<sup>3</sup>, Eom, Tae Sung<sup>4</sup>, Kim, Jin Woo<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Research Professor, Seismic Research and Test Center, Pusan National University, Yangsan, 50612, Korea

<sup>2</sup>Senior Researcher, Seismic Safety Center, Korea Conformity Laboratories, Cheongju, 28115, Korea

<sup>3</sup>Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Korea

<sup>4</sup>Professor, School of Architecture, Dankook University, Yongin, 16890, Korea

**Abstract** - In this study, H-shaped shear panel dampers were tested under cyclic loading of a constant displacement amplitude to investigate the effects of stiffener reinforcement on damper performance. Test results showed that although both specimens with and without stiffeners exhibited stable spindle-shaped hysteresis curve, deformation capacity against cycle loading was significantly enhanced in the specimen with stiffeners. For further investigation on the damper performance, nonlinear finite element analysis was performed. The analyses showed that the specimen with stiffeners exhibited a stable plastic behavior, maintaining a uniform distribution of plastic strains; however, in the specimen without stiffener, plastic strains were nonuniformly distributed at the tension and compression fields as out-of-plane deformations increased.

**Keywords** - H-type shear panel damper, Stiffener reinforcement, Deformation capacity, Plastic strain, Out-of-plane deformation

### 1. 서론

구조물의 지진피해를 경감하기 위하여 구조물 내에 지진 에너지 흡수부재를 설치하고 그 부재의 지진에너지 소산을 통해 구조물의 응답을 수동적으로 제어하는 제진구조가 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 수동적인 제어는 일반적으로 금속 또는 마찰계의 변위에 의존하는 지진에너지 흡수부재(변위 의존형 댐퍼)가 주로 사용된다<sup>[2]~[4]</sup>.

변위 의존형 댐퍼의 일종인 전단항복형 강재댐퍼는 상·하 엔드 플레이트와 좌·우 플랜지로 둘러싸인 패널부로 구성된 H형 단면(이하 H형 전단패널 댐퍼)이 주로 사용되며, 이에

해당하는 연구사례로 Kim *et al.*<sup>[5]</sup>은 소성이론을 이용한 전소성 전단내력과 휨변형과 전단변형을 고려한 초기강성식을 제안하였으며 패널부에 SS235급, 플랜지에 SM325급 강재를 적용한 H형 전단패널부에 대해 재하변위를 변수로 한 일정진폭 재하실험을 실시하여 제안식의 정합성 검증과 댐퍼의 탄·소성 역학특성에 대해 검토하였다. 또한 Manson-Coffin 법칙을 이용한 재하진폭과 재하횟수의 관계에 대해 H형 전단패널 댐퍼의 실험데이터를 기반으로 작성된 일본 건축학회(Architectural Institute of Japan) 강구조제진설계 지침의 피로곡선과 비교·검토하였다.

이러한 H형 전단패널 댐퍼는 댐퍼를 지지하는 부재의 형식에 따라 브레이스 지지 형식, 벽 패널 형식, 간주 지지 형식 등으로 구조물에 배치되며, 강재가 전단항복한 다음 소성변형을 반복하는 것으로 지진에너지를 흡수하여 기둥, 보 등과 같은 주요부재에 발생하는 응답변위 및 작용력을 감소시켜 구조물의 손상을 완화한다. 지진 종료까지 댐퍼가 효율적으로 거동하기 위해서는 댐퍼의 변형성능을 확보하는 것이 중요하며 그 성능을 향상시키기 위하여 패널부에 비교적

Note.-Discussion open until April 30, 2022. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 09, 2021; revised on September 15, 2021; approved on September 15, 2021.

Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-43-210-8961 Fax. +82-43-210-8919

E-mail. kimjinwoo@kcl.re.kr

연성이 큰 강재(SN 강재 또는 저항복점 강재)를 사용하거나, 패널부에 스티프너를 보강하는 방법이 알려져 있다<sup>[6]-[8]</sup>.

본 연구에서는 H형 전단패널 댐퍼에 대해 연강을 적용하여 패널부의 스티프너의 보강 유무에 따른 변형성능 향상효과를 답습하고 역학적 특성을 파악하는 것을 목적으로 일정한 진폭 반복재하 실험을 수행하였다. 또한, 유한요소해석을 수행하여 실험의 하중-변형관계를 추적하고 각 부위의 응력 및 변형을 분포상황을 파악하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 실험체 구성 및 재료특성

Fig. 1과 Table 1에 실험체 형상과 실험체 일람을 나타냈다. 실험변수는 패널부의 스티프너 보강 유무이다. 스티프너로 보강하지 않은 HSPD-NR-52.5 실험체의 단면형상은 H-222×50×4×6(댐퍼의 폭  $D=222$  mm, 플랜지 폭  $b=50$  mm, 패널부의 두께  $t_w=4$  mm, 플랜지 두께  $t_f=6$  mm)로 패널부의 형상비(패널부의 폭  $D-2t_f$ 에 대한 높이  $h$ 의 비)가 1이고

패널부의 폭에 대한 두께의 비( $(D-2t_f)/t_w$ , 이하 판폭두께비)가 52.5이다. 각 부위에 대한 접합은 플랜지 양단의 외측을 2층 3패스로 용접하고 반대측을 가우징한 다음, 2층 2패스의 완전용입용접으로 상·하 엔드 플레이트와 접합하였으며 이외의 접합부는 모살용접으로 접합하였다. 스티프너로 보강한 HSPD-SR-25.8 실험체는 HSPD-NR-52.5 실험체에 대하여 패널부와 동일한 두께(4 mm)를 가진 십자형의 스티프너를 패널부의 앞·뒷면에 모살용접하여 접합하였다. 이러한 스티프너 보강에 의해 패널부의 높이방향과 폭방향으로 각각 분절되어 총 4구역의 패널부로 구성되며 각 패널부의 폭  $h'$ 에 대한 두께의 비는 25.8이다.

두 실험체는 플랜지의 폭두께비  $(b/2)t_f$ 가 4.17로 플랜지의 폭두께비 제한값  $\lambda_r = 0.64 \sqrt{k_c E / F_y}$ 이 15.04를 하회하도록 설계<sup>[9]</sup>하여 패널부의 전단변형에 의한 플랜지의 국부좌굴을 방지하였다.

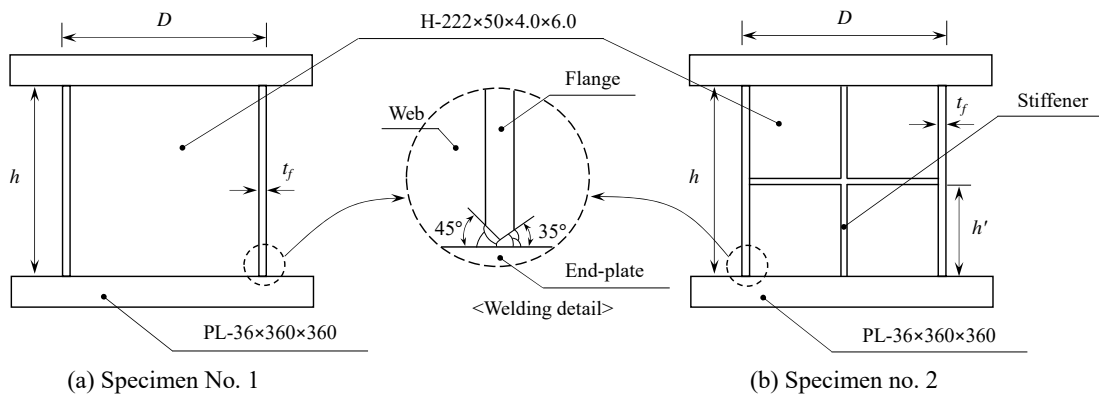
실험체를 구성하는 SPHC 강재의 기계적 성질을 파악하기 위하여 인장시험을 실시하였다. 시험편은 KS B 0801<sup>[10]</sup>에 따라 패널부와 플랜지는 5호의 판형으로 각 3개의 시험편을 제작하였다. Table 2에 실험체의 인장소재 시험결과를 나

**Table 1.** Specimens list

| No. | Specimen*    | Steel grade | $D$<br>(mm) | $h$<br>(mm) | $t_w$<br>(mm) | $t_f$<br>(mm) | $b$<br>(mm) | $\frac{(D-2t_f)}{t_w}$ | $\frac{h}{(D-2t_f)}$ | Stiffener                              | Loading method                                                      |
|-----|--------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|-------------|------------------------|----------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1   | HSPD-NR-52.5 | SPHC        | 222.0       | 210.0       | 4.0           | 6.0           | 50.0        | 52.5                   | 1.0                  | -                                      | Constant amplitude cyclic loading (deformation amplitude: 0.05 rad) |
| 2   | HSPD-SR-25.8 |             |             |             |               |               |             | 25.8                   |                      | Stiffener reinforcement (cross-shaped) |                                                                     |

\*Specimen name consisted of: (1) H-type shear panel steel damper (HSPD); (2) presence or absence of stiffener reinforcement (NR: none reinforcement, SR: stiffener reinforcement); (3) width-thickness of panel (number at the end).

\*\* $D$ : width of specimen,  $h$ : height of specimen,  $t_w$ : thickness of panel,  $t_f$ : thickness of flange,  $b$ : width of flange,  $(D-2t_f)/t_w$ : width-thickness ratio of web,  $h/(D-2t_f)$ : aspect ratio of panel



**Fig. 1.** Details of specimens

**Table 2.** Material properties

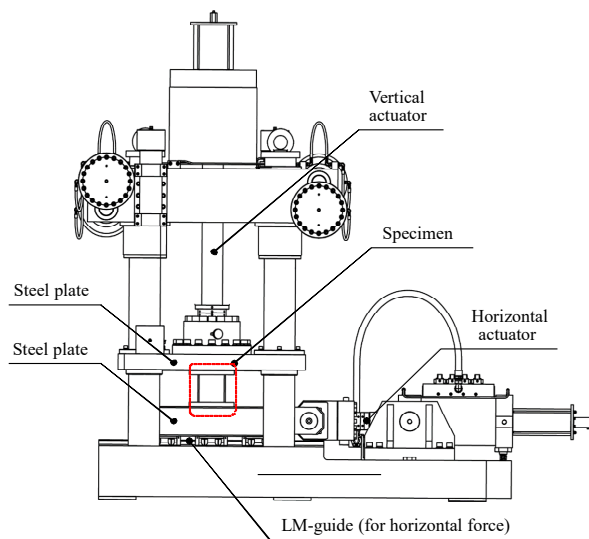
| Part   | Material | $t$<br>(mm) | $E$<br>(GPa) | $\sigma_y$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_u$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Yield ratio | $EL$<br>(%) |
|--------|----------|-------------|--------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------|-------------|
| Web    | SPHC     | 4.0         | 192          | 205.1                              | 331.2                              | 0.62        | 50.2        |
| Flange |          | 6.0         | 213          | 212.0                              | 343.8                              | 0.62        | 50.3        |

$t$ : measured thickness of each part,  $E$ : elastic modulus,  $\sigma_y$ : yield stress (0.2 % off-set strength),  $\sigma_u$ : tensile stress,  $EL$ : rupture elongation

타냈다. 표 중의 값은 각각의 평균치를 나타내며 항복응력  $\sigma_y$ 는 0.2 % 오프셋 강도로 산출한 값이다. 패널부와 플랜지의 기계적 성질은 관련 국내기준<sup>[11]</sup>의 최저 인장강도와 연신율을 만족하였다.

## 2.2 실험체 설치 및 가력방법

Fig. 2에 재하장치와 실험체의 설치개요를 나타냈다. 실험체는 높이방향으로 역대칭 모멘트가 분포하도록 강제회전이 발생하지 않는 수직 가력용 플레이트와 수평 가력용 플레이트에 고정하였다. 또한 실험체에 장기축력이 작용하지 않는 경우를 고려하여 수직 플레이트의 상부에 설치된 수직 액추에이터를 제어하여 수직 플레이트의 중량 등에 의한 축력이 실험체에 작용하지 않도록 하였다. 재하방법은 실험체에 발생하는 평균 전단변형각  $\gamma$ (수평변위  $\delta$ 를 실험체의 높이  $h$ 로 나눈 값)이 5 %의 일정진폭이 되도록 1,000 kN 용량의 수평 액추에이터를 이용하여 반복가력하였으며, 내력이 최대내력의 70 % 이하로 저하될 때까지 반복재하를 실시하였다.

**Fig. 2.** Test set-up

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 하중-변위 관계

Fig. 3에 실험체의 수평력  $Q$ 와 평균전단변형각  $\gamma$ 의 관계를 나타냈다. 두 실험체는 공통적으로 안정적인 방추형의 이력곡선을 나타내었고, 종국거동은 패널부의 면외변형에 의한 내력저하로 나타났다.

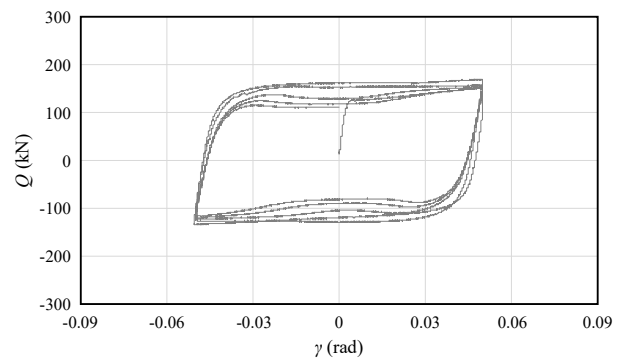
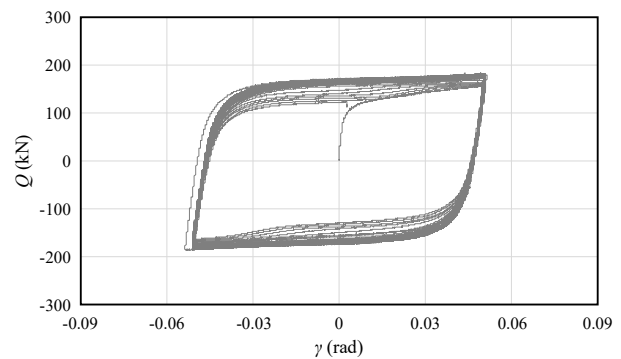
**(a) HSPD-NR-52.5****(b) HSPD-SR-25.8****Fig. 3.** Shear force-shear deformation relationship

Table 3에 전소성 전단강도와 탄성강성의 실험값에 대해 계산값과 비교하여 나타냈다. 여기서 전소성 전단강도와 초기강성의 계산값은 Kim *et al.*<sup>[5]</sup>, Kim<sup>[12]</sup>이 제안한 식이며 요약하면 다음과 같다.

전소성 전단강도 산정식은 전단항복영역과 휨항복영역을 고려하여 소성이론에 기반한 식이며, 전단항복영역이 패널부 폭 안에 존재하는 경우와 플랜지 두께 안에 존재하는 경우에 대해 전단항복영역계수  $\alpha$ 를 변수로 최소로 되는 값을 산출하여 각 경우의 산정치 중 작은 값을 채택하며 다음 식으로 나타낸다.

- 전단항복영역이 패널부의 폭 안에 존재하는 경우:

$${}_cQ_{p1} = {}_w\tau_y \cdot \alpha \cdot t_w + 2{}_w\sigma_y \cdot t_w \cdot \frac{1}{h} \cdot \left( \frac{D - 2t_f - \alpha}{2} \right)^2 + 2 \cdot {}_f\sigma_y \cdot b \cdot t_f \cdot \frac{1}{h} (D - \alpha - t_f) \quad (1a)$$

- 전단항복영역이 플랜지 두께 안에 존재하는 경우:

$${}_cQ_{p2} = {}_w\tau_y \cdot (D - 2t_f) \cdot t_w + {}_f\tau_y \cdot \{ \alpha - (D - 2t_f) \} \cdot b + 2{}_f\sigma_y \cdot b \cdot \left( \frac{D - \alpha}{2} \right)^2 \quad (1b)$$

$${}_cQ_p = \min\{ {}_cQ_{p1}, {}_cQ_{p2} \} \quad (1c)$$

여기서,  $\alpha$ 는 전단항복영역계수,  ${}_w\sigma_y$ 와  ${}_f\sigma_y$ 는 각 웹과 플랜지의 항복응력,  ${}_w\tau_y$ 와  ${}_f\tau_y$ 는 각 웹과 플랜지의 전단항복응력을 나타낸다.

초기강성은 휨변형과 전단변형을 고려하여 다음의 식으로 나타낸다.

$$Q = {}_cK \cdot \gamma \quad (2a)$$

$${}_cK = \left( \frac{h^2}{12E \cdot I} + \frac{1}{G \cdot A_p} \right)^{-1} \quad (2b)$$

여기서,  $E$ 와  $G$ 는 각각 탄성계수와 전단탄성계수,  $I$ 는 단면 2차모멘트,  $h$ 는 댐퍼의 높이,  $A_p$ 는 웹(이하, 패널부)의 단면적을 나타낸다.

Table 3에서 전소성 전단내력의 실험값은  $Q-\gamma$  관계에서 0.35 % 오프셋 강도로 산출한 값<sup>[13]</sup>이며 탄성강성의 실험값은 전소성 전단강도 실험값에 대해 1/3값의 할선강성으로 산출한 값이다.

각 실험체에 대한 전소성 전단강도 실험값과 계산값의 비  ${}_eQ_p/{}_cQ_p$ 는 1.04, 0.94이며, 탄성강성의 실험값과 계산값의 비  ${}_eK/{}_cK$ 는 1.02, 1.13으로 스티프너 보강 유무에 관계없이 Kim *et al.*이 제안한 식을 이용하여 전소성 전단강도와 탄성강성의 실험결과를 양호하게 평가하는 것을 확인할 수 있다.

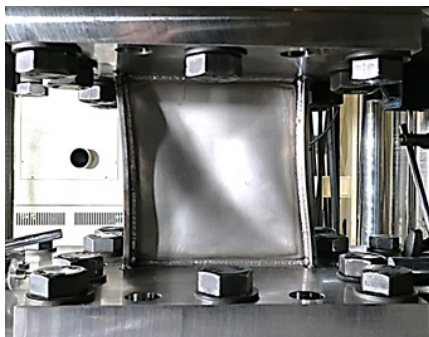
### 3.2 내력상승률-누적 소성전단변형각 관계

Fig. 4에 내력상승률과 누적 소성전단변형각  $\Sigma\gamma_p$ 의 관계

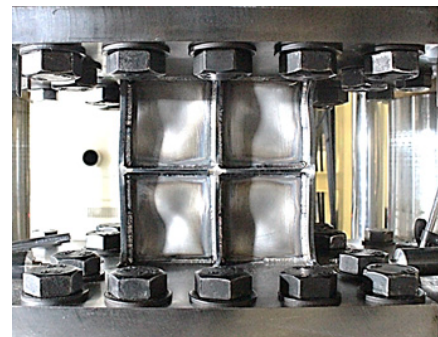
**Table 3.** Comparison of experimental and calculated results for full plastic shear strength and initial stiffness

| Specimen*    | ${}_eQ_p$<br>(kN) | ${}_cQ_p$<br>(kN) | ${}_eQ_p/{}_cQ_p$ | ${}_eK$<br>(kN/rad) | ${}_cK$<br>(kN/rad) | ${}_eK/{}_cK$ | ${}_eQ_{\max}$<br>(kN) | ${}_eQ_{\max}/{}_eQ_p$ |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------|------------------------|------------------------|
| HSPD-NR-52.5 | 125.2             | 120.4             | 1.04              | 61,440.7            | 60,019.9            | 1.02          | 170.3                  | 1.36                   |
| HSPD-SR-25.8 | 113.1             |                   | 0.94              | 67,668.8            |                     | 1.13          | 183.2                  | 1.62                   |

${}_eQ_p$ : experimental value of full plastic shear strength,  ${}_cQ_p$ : calculated value of full plastic shear strength (Eq. (1c)),  ${}_eQ_{\max}$ : experimental value of maximum shear strength,  ${}_eK$ : experimental value of elastic stiffness,  ${}_cK$ : calculated value of elastic stiffness (Eq. (2b))



(a) HSPD-NR-52.5

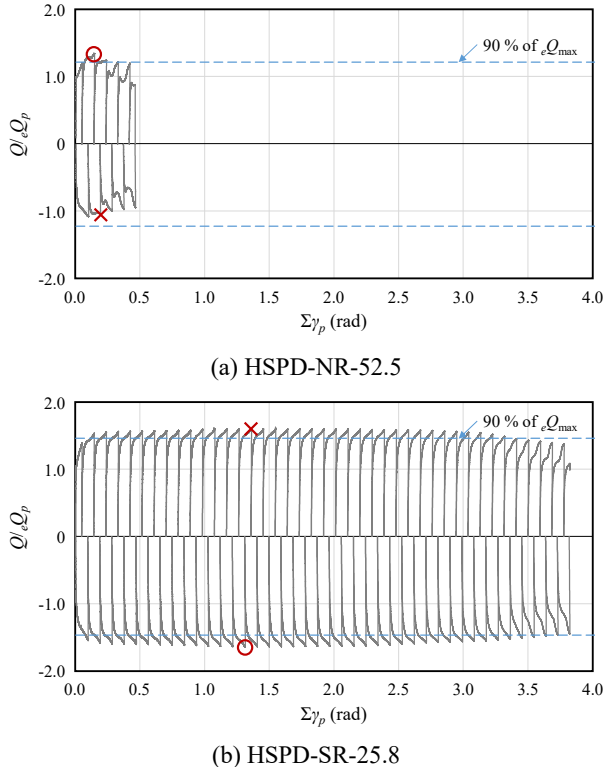


(b) HSPD-SR-25.8

**Fig. 4.** Failure mode

를 나타냈다. Fig. 4의 세로축은 각 사이클의 내력  $Q$ 를 전소성 전단강도의 실험값  $eQ_p$ 로 나눈 값(내력상승률)이며, 가로축은 Fig. 3의  $Q-\gamma$  관계에서  $Q$ 를 정방향 가력 측과 부방향 가력 측으로 구분하고 평균 전단변형각  $\gamma$ 에 대해 탄성변형각을 제거하여 누적한 값을 나타낸다. 또한 그림 중의  $\circ$  기호는 최대내력  $eQ_{max}$ ,  $\times$  기호는 면외방향 변형 발생이 육안으로 관찰된 시점을 나타내며, 점선은 각 실험체 내력이  $eQ_{max}$ 의 90 %로 저하된 값을 나타낸다.

HSPD-NR-52.5 실험체와 HSPD-SR-25.8 실험체의 최대내력상승률  $eQ_{max}/eQ_p$ 는 각각 1.36, 1.62로 스티프너로 보강한 HSPD-SR-25.8 실험체가 조금 높은 경향이 나타났다. 또한, 두 번째 사이클에서 면외방향 변형이 발생한 이후 내력이 저하하는 HSPD-NR-52.5 실험체와 비교하여 HSPD-SR-25.8 실험체는 14번째 사이클에서 최대내력에 도달한 후, 면외방향의 변형이 발생하여 내력이 저하하였으며 HSPD-NR-52.5 실험체와 비교하여 완만하게 내력이 저하하는 추이임을 확인할 수 있다. 즉, 스티프너 보강에 의해 분절된 패널부의 판폭두께비가 작아지는 것에 의해 패널부의 면외방향 변형의 발생을 억제함으로써 댐퍼의 전체적인 변형능력



**Fig. 5.** Shear strength increasing ratio-cumulative plastic shear deformation ( $\times$ : observance of out-of-plane deformation,  $\circ$ : maximum shear strength)

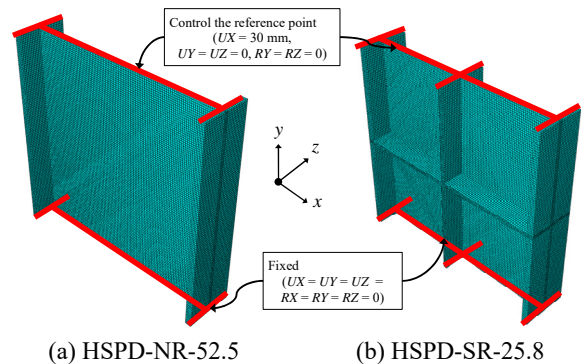
이 향상된다. 이는 전단패널의 판폭두께비가 감소할수록 변형능력이 향상되는 선행연구결과<sup>[8]</sup>와 상응하며, 이 경향에 대해서는 다음 장의 유한요소해석에서 검토한다.

## 4. 유한요소해석

### 4.1 해석개요

본 장에서는 스티프너 보강 유무에 따른 패널부의 응력전달 메커니즘을 파악하기 위하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 해석을 위해 상용프로그램인 ABAQUS<sup>[14]</sup>를 사용했으며, Fig. 6에 해석모델의 개요를 나타냈다. 해석대상은 Table 1에 나타난 HSPD-NR-52.5 실험체와 HSPD-SR-25.8 실험체에서 상·하 엔드 플레이트와 각 부위의 접합부를 제외한 패널부와 플랜지 및 스티프너이며, 3차원의 해석모델을 구축하기 위하여 하나의 솔리드 요소에 8개의 절점을 가지는 C3D8R요소를 사용하여 각 부위를 일체화하였다. 해석모델에는 Table 2에 기재된 각 부위의 실험 두께를 적용하였고, 요소의 최대크기는 2 mm로 설정하였다. 포아송비는 0.3, 각 부위의 탄성계수는 Table 2에 나타난 값을 입력하였다. 또한 응력-변형률 관계는 Table 2에 요약한 인장 시험결과를 진응력-대수변형률로 치환하고, 다직선의 근사값을 입력하였다. 소성역에서의 구성방정식은 von Mises의 항복조건과 등방경화법칙을 적용하였으며, 전단좌굴을 고려하여 대변형(large deformation) 옵션을 활성화하였다.

하중 및 경계조건에 대해서는 실험조건을 모사하여 해석모델의 하단부에 대해 3축 방향의 변위와 회전을 구속하였으며, 상부면에 대해 하중방향(Fig. 6의  $x$ 방향)을 제외한 다른 방향의 변위와 회전을 구속하였으며,  $x$ 방향으로 30 mm의 강제변위( $\gamma \approx 0.143$  rad)를 단조재하였다.



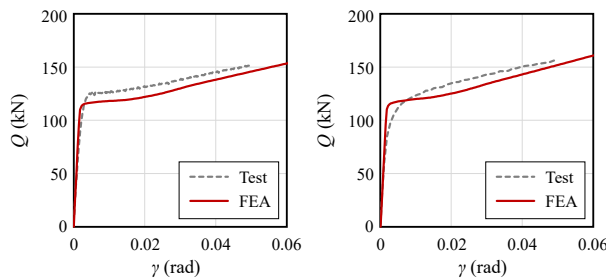
**Fig. 6.** Finite element model

## 4.2 해석결과

### 4.2.1 실험결과와의 비교(하중-변위 관계)

Table 4에 해석결과로부터 산출된 전소성 전단강도  $aQ_p$ 와 초기강성  $aK$ 를 실험결과와 비교하여 나타냈다. 여기에서, 전소성 전단강도와 초기강성의 해석값은 실험값과 동일한 방법으로 산출하였다. 각 실험체에 대해 전소성 전단강도의 해석값과 실험값의 비  $aQ_p/eQ_p$ 는 각각 0.93, 1.03으로 나타났으며, 초기강성의 해석값과 실험값의 비  $aK/eK$ 는 각각 1.09, 1.00으로 해석결과는 실험결과와 비교하여 유사한 대응을 나타낸다.

Fig. 7에 해석결과로부터 얻은  $Q-\gamma$  관계를 실험결과와 비교하여 나타냈다. 여기서, 실험결과는 일정 진폭으로 반복 가력한 각 실험체에 대해 1/4 사이클까지의 결과를 나타낸다. 해석결과는 스티프너의 보강 유무에 관계없이 실험결과를 미소하게 하회하는 경향을 나타내며, 평균전단변형각이 커짐에 따라 그 차이가 작아지는 것을 확인할 수 있다.



(a) HSPD-NR-52.5

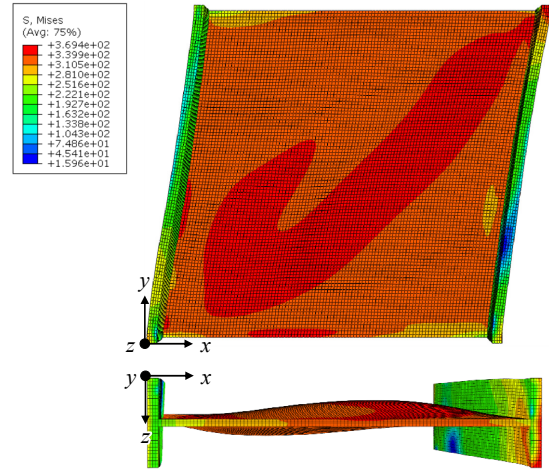
(b) HSPD-SR-25.8

Fig. 7. Shear force-shear deformation relationship (comparison with test results)

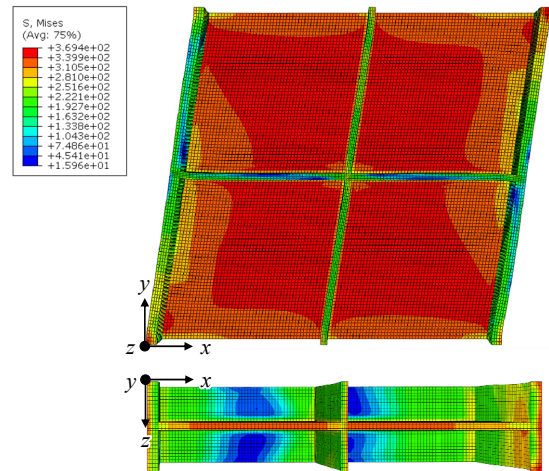
### 4.2.2 응력 및 변형도 분포

Fig. 8은 각 해석모델의 von Mises 응력 분포를 나타내는 데( $\gamma = 0.14$  rad), 응력값이 해당 강재의 항복강도 이상일 경우 소성상태에 도달하였음을 의미한다. 두 해석모델 모두 패널부에 소성이 집중되었으며, 전형적인 전단변형상태를 보

인다.  $\gamma$ 가 커짐에 따라 HSPD-NR-52.5 모델의 면외방향 변형은 점차 증가하는 반면, HSPD-SR-25.8 모델은 면외방향의 변형이 미미한 것을 확인할 수 있다.



(a) HSPD-NR-52.5



(b) HSPD-SR-25.8

Fig. 8. Mises stress distribution ( $\gamma = 0.14$  rad)

실험체의 스티프너 보강 유무에 따른 패널부의 변형도 분포를 파악하기 위해 다음 식으로 나타나는 등가소성변형률  $\epsilon_{eq}$ 를 구성하는 각 방향의 소성변형률 성분을 분석하였다.

Table 4. Comparison of analysis and experimental results for full plastic shear strength and initial stiffness

| Specimen     | $aQ_p$<br>(kN) | $eQ_p$<br>(kN) | $eQ_p/cQ_p$ | $aK$<br>(kN/rad) | $eK$<br>(kN/rad) | $eK/cK$ |
|--------------|----------------|----------------|-------------|------------------|------------------|---------|
| HSPD-NR-52.5 | 115.9          | 125.2          | 0.93        | 67,026.4         | 61,440.7         | 1.09    |
| HSPD-SR-25.8 | 116.6          | 113.1          | 1.03        | 67,336.2         | 67,668.8         | 1.00    |

$aQ_p$ : analysis value of full plastic shear strength,  $eQ_p$ : experimental value of full plastic shear strength,  $aK$ : analysis value of elastic stiffness,  $eK$ : experimental value of elastic stiffness

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\varepsilon_{px}^2 + \varepsilon_{py}^2 + \varepsilon_{pz}^2 + \frac{1}{2}(\gamma_{pxy}^2 + \gamma_{pyz}^2 + \gamma_{pzx}^2)} \quad (3)$$

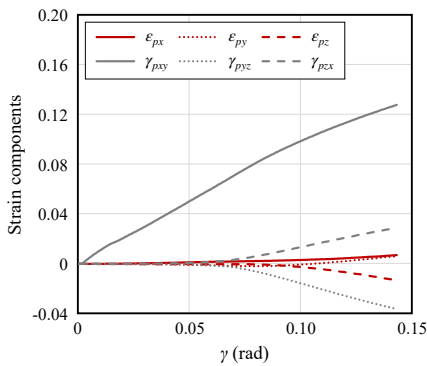
여기서,  $\varepsilon_{pi}$ 는  $i$ 방향의 축소성변형률,  $\gamma_{pij}$ 는  $ij$ 방향의 전단소성변형률을 나타낸다.

Fig. 9은 각 해석모델에 대해  $\gamma$ 에 따른 패널부 중앙의 각 방향 소성변형률의 추이를 나타낸다. HSPD-NR-52.5 모델에서는  $\gamma$ 가 0.07 rad 이상에서 면외방향의 전단소성변형률( $\gamma_{pyz}, \gamma_{pzx}$ )가 증가하며, 면내방향의 전단소성변형률  $\gamma_{pxy}$ 에 비교하여 현저히 작은 값을 확인할 수 있다. 이는 순수 전단에 가까운 거동을 나타내며 이러한 경향은 HSPD-SR-25.8 모델에서 뚜렷이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

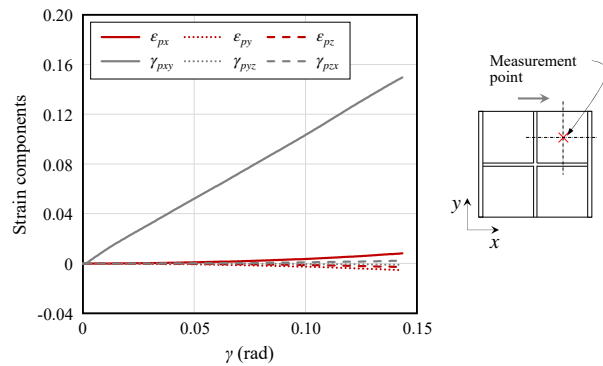
Fig. 10에  $\gamma$ 에 따른 패널부 내의 등가소성변형률  $\varepsilon_{eq}$  분포와 패널부의 판폭두께비의 상관관계를 나타냈다. 측정부위

는 Fig. 10에 병기한 것과 같이 패널부의 중앙(P1)과 패널부 중앙을 기점으로 전단변형에 의해 인장이 발생하는 방향의 중심(P2)이다. 두 해석모델의 P1 위치에 발생하는  $\varepsilon_{eq}$ 는 스티프너의 보강 유무에 관계없이 거의 같은 값을 나타낸다. 한편, P2 위치에 발생하는  $\varepsilon_{eq}$ 는  $\gamma$ 가 커짐에 따라 패널부의 판폭두께비가 큰 HSPD-NR-52.5 모델이 더 큰 값을 나타내며, P3 위치는 이와 반대의 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 스티프너 보강에 의해 패널부의 판폭두께비가 감소함에 따라 전단변형에 의해 발생하는 인장영역 비율이 작아지는 것을 의미한다.

Fig. 12에 Fig. 11으로 정의하는 인장영역과 압축영역에 위치하는 절점으로부터 산출한  $\varepsilon_{eq}$  분포를 나타냈다. 각 해석모델은  $\gamma = 0.06$  rad 이하에서 인장영역과 압축영역의  $\varepsilon_{eq}$ 가 동일한 분포를 나타내며 거의 같은 최대  $\varepsilon_{eq}$  값을 나타낸다. 하지만 HSPD-NR-52.5 모델은  $\gamma = 0.09$  rad 이후에서 면외

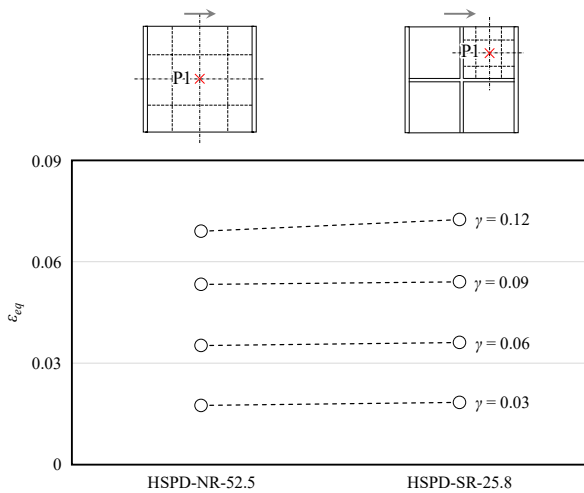


(a) HSPD-NR-52.5

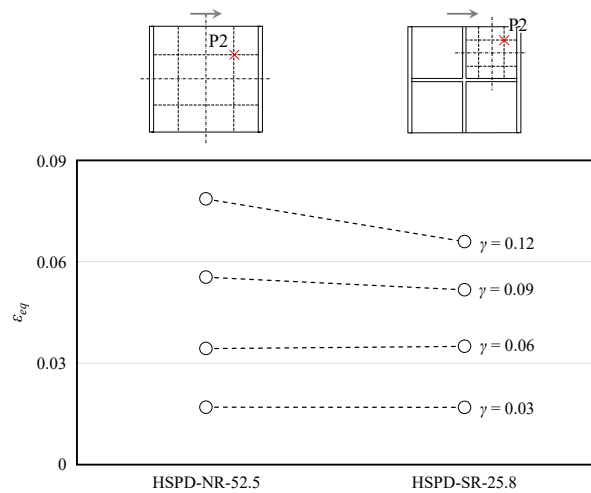


(b) HSPD-SR-25.8

Fig. 9. Plastic strain distribution at center of panel



(a) P1 (center of panel)



(b) P2 (tension field)

Fig. 10. Equivalent plastic strain distribution

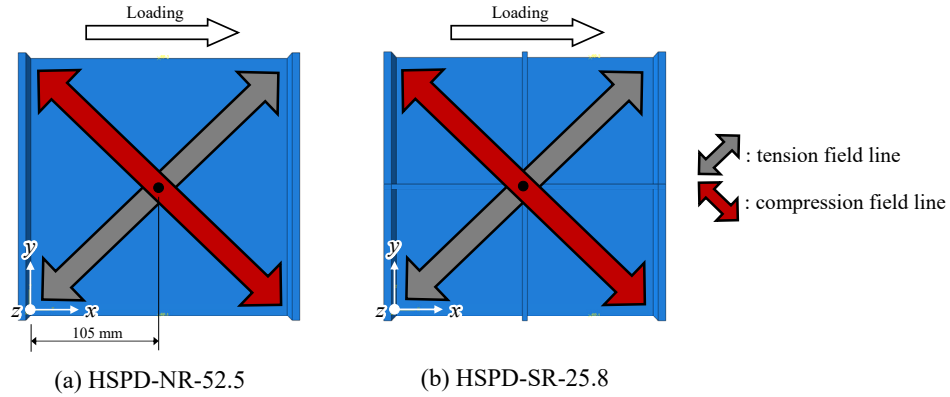


Fig. 11. Definitions of tension field and compression field

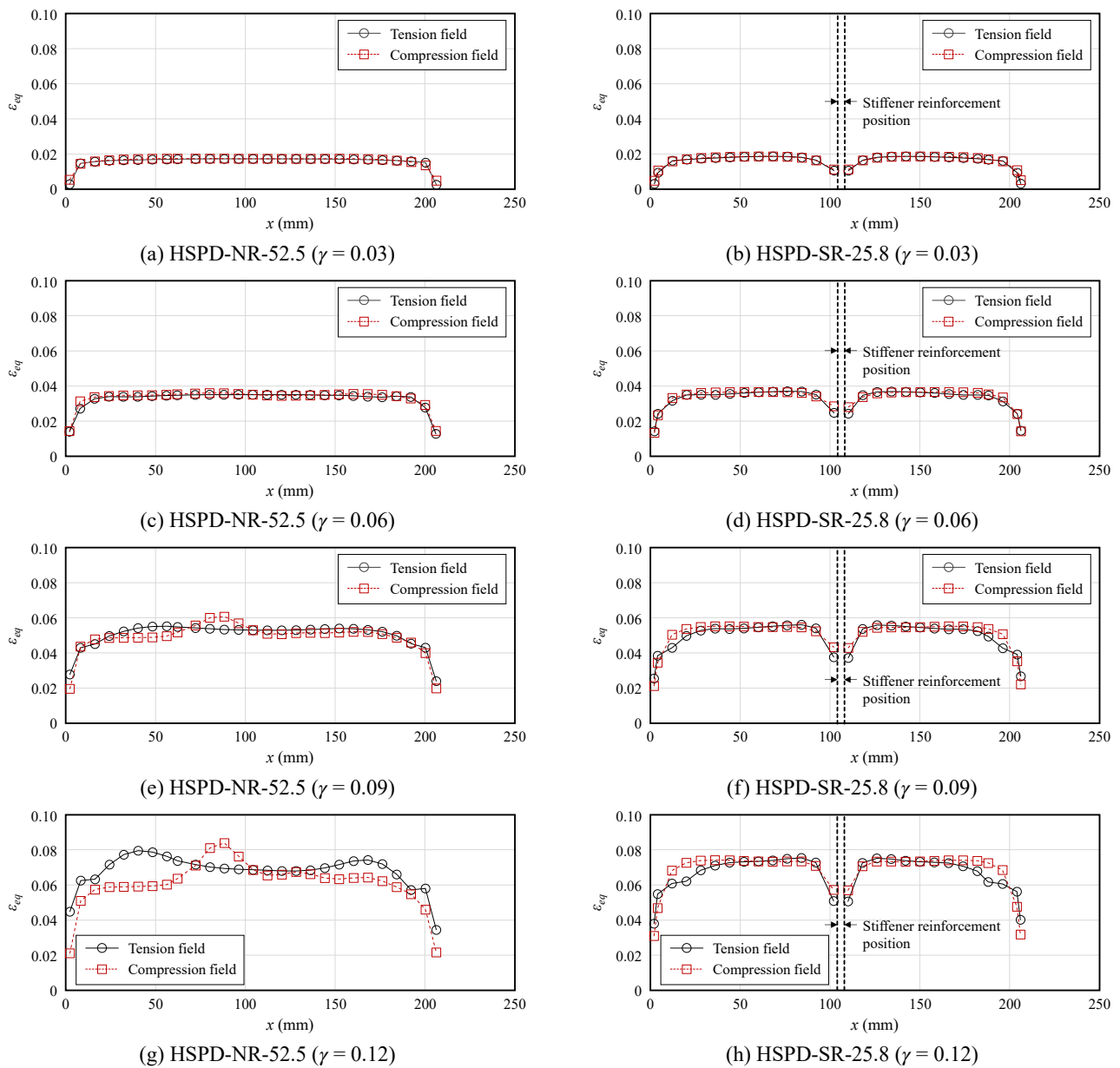


Fig. 12. Equivalent plastic strain distribution at tension and compression field line

방향의 변형에 따른 패널부의 기하학적 변형으로 인해  $\varepsilon_{eq}$ 의 분포가 인장영역과 압축영역의 불규칙적으로 발생하였다. 반면, 스티프너가 보강된 HSPD-SR-25.8 모델은  $\gamma = 0.09$  rad 이후에서도 패널부 전영역에 대해 비교적 균등한  $\varepsilon_{eq}$  분포를 나타내며 인장영역과 압축영역에서 거의 동일한  $\varepsilon_{eq}$ 가 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

상기의 해석결과를 요약하면, H형 전단패널 댐퍼의 패널부의 판폭두께비가 커지면 전단변형에 의해 발생하는 인장영역 비율(Fig. 10)이 커지며, 전단변형각의 증가에 따라 패널부의 인장영역과 압축영역의 변형도가 불규칙적으로 발생하는 것이다(Fig. 12). 이는 패널부의 판폭두께비가 커지면 패널부의 전단좌굴이 조기에 발생하는 것을 시사한다. 다만, 이 결과는 단조재하에 대한 해석결과이므로 향후 반복재하에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 연강(SPHC 강재)으로 제작된 H형 전단패널 댐퍼를 대상으로 스티프너의 보강에 따른 댐퍼의 변형능력 향상효과를 답습하기 위해 일정진폭 반복가력실험을 수행하였다. 또한 비선형 유한요소해석을 실시하여 스티프너의 유무에 따른 패널부의 응력 및 소성변형률 분포를 분석하였고, 댐퍼의 역학특성을 파악하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 실험결과에 따른 하중-변형 관계는 스티프너 보강 유무에 관계없이 안정적인 방추형의 이력특성을 나타내었으며, 패널부의 면외방향 좌굴에 의해 내력저하가 발생하였다. H형 전단패널 댐퍼의 전소성 전단강도와 초기강성은 저자가 선행연구를 통해 제안한 산정식을 통해 유사하게 도출할 수 있음을 확인하였다.
- (2) 스티프너를 보강한 댐퍼의 내력상승률( $eQ_{max}/eQ_p$ )은 1.63으로 나타났으며, 무보강 댐퍼의 내력상승률(=1.36)에 비해 높게 나타났다. 또한 스티프너 보강은 패널부의 판폭두께비를 감소시킴에 따라 전단좌굴을 억제하고, 이를 통해 댐퍼의 변형능력을 향상시키는 결과를 확인하였다. 이러한 경향은 비선형 유한요소해석을 통해 추가적으로 분석되었다.
- (3) 해석결과로부터 무보강 댐퍼(패널부의 판폭두께비가 큰 경우)는 스티프너를 보강한 댐퍼(패널부의 판

폭두께비가 작은 경우)와 비교하여 전단변형에 의해 발생하는 인장영역 비율이 커지며, 전단변형각의 증가에 따라 패널부의 인장영역과 압축영역의 변형도가 불규칙적으로 발생하는 것을 확인하였다.

본 연구의 결과는 특정 강재 및 패널부의 판폭두께비에 대한 것이므로 이에 대한 영향을 보다 정량적인 경향을 도출하기 위해 다양한 강재 및 판폭두께비의 변화에 대한 실험 및 해석연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(20CTAP-C157615-01)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌(References)

- [1] Soong, T.T., and Dargush, G.F. (1997) *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons, UK.
- [2] Whittaker, A.S., Bertero, V.V., Thompson, C.L., and Alonso, L.J. (1991) Seismic Testing of Steel Plate Energy Dissipation Devices, *Earthquake Spectra*, Sage, Vol.7, No.4, pp.563-604.
- [3] Tsai, K.-C., Chen, H.-W., Hong, C.-P., and Su, Y.-F. (1993) Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction, *Earthquake Spectra*, Sage, Vol.9, No.3, pp.505-528.
- [4] De la Llera, J.C., Esguerra, C., and Almazán, J.L. (2004) Earthquake Behavior of Structures with Copper Energy Dissipators, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol.33, No.3, pp.329-358.
- [5] Kim, H.R., Kim, S.B., Eom, T.S., Kim, J.H., and Kim, J.W. (2020) Experimental Study on Mechanical Characteristics of H-Type Shear Panel Steel Damper Under Constant Amplitude Deformation, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.5, pp.321-330 (in Korean).
- [6] Nakashima, M., Iwai, S., Iwata, M., Takeuchi, T., Konomi, S., Akazawa, T., and Saburi, K. (1994) Energy Dissipation Behavior of Shear Panels Made

- of Low Yield Steel, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol.23, No.12, pp.1299-1313.
- [7] Chaofeng, Z., Zhisheng, Z., and Qiuju, J. (2012) Static and Dynamic Cyclic Performance of a Low-Yield-Strength Steel Shear Panel Damper, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.79, pp.195-203.
- [8] Popov, E.P., and Engelhardt, M.D. (1988) Seismic Eccentrically Braced Frames, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.10, pp.321-354.
- [9] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017) *Design Standards of Steel Structural Members (Load and Resistance Factor Design)* (KDS 14 31 10: 2017), Korea (in Korean).
- [10] Korean Agency for Technology and Standards (2007) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).
- [11] Korean Agency for Technology and Standards (2008) *Hot-Rolled Mild Steel Plates, Sheets and Strip* (KS D 3501: 2008), Korea (in Korean).
- [12] Kim, J.W. (2002) *Seismic Response Characteristics of a Steel Structure Frame with Shear Type Steel Damper Using Low Yield Strength Circular Hollow Section Supported by Stud Column*, Ph.D. Dissertation, Osaka University, Japan (in Japanese).
- [13] Architectural Institute of Japan (2012) *Recommendations for Design of Connections in Steel Structures*, AIJ, Japan (in Japanese).
- [14] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2013) *Abaqus/Standard User's Manual, Ver. 6.14*, DSS, USA.

---

**요 약 :** 이 연구에서는 스티프너 보강이 댐퍼 성능에 미치는 영향을 조사하기 위해 일정한 변위진폭을 갖는 반복하중 하에서 H형 전단패널댐퍼를 실험하였다. 실험 결과, 보강재(스티프너)가 있는 실험체와 없는 실험체 모두 안정적인 방추형의 이력곡선을 나타내었지만, 스티프너가 있는 실험체에서 반복하중에 대한 변형능력이 크게 향상되었다. 댐퍼 성능에 대한 추가 조사를 위해 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과, 스티프너가 있는 실험체는 균일한 소성변형률 분포를 유지하면서 안정적인 소성거동을 나타냈다. 하지만 스티프너가 없는 실험체의 경우 면외변형이 증가함에 따라 인장역 및 압축역에서 소성변형률이 불균일하게 분포되었다.

**핵심용어 :** H형 전단패널 댐퍼, 스티프너 보강, 변형능력, 소성변형률, 면외변형

---